

Numérisation des architectures d'émission RF en communications numériques : enjeux et défis

Genevieve Baudoin, Antoine Diet, Fabien Robert, Yves Louët, Fabio Epifano, Philippe Cathelin, Martine Villegas

▶ **To cite this version:**

Genevieve Baudoin, Antoine Diet, Fabien Robert, Yves Louët, Fabio Epifano, et al.. Numérisation des architectures d'émission RF en communications numériques : enjeux et défis. Conférence plénière invitée aux 17èmes Journées Nationales Micro-ondes, JNM 2011, May 2011, Brest, France. hal-00641211

HAL Id: hal-00641211

https://centralesupelec.hal.science/hal-00641211

Submitted on 15 Nov 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Numérisation des architectures d'émission RF : enjeux et défis

Geneviève BAUDOIN - *Université Paris-Est, ESYCOM, ESIEE Paris*
Antoine Diet - *Paris Sud-11, L2S-DRE, UMR 8506*
Martine Villegas - *Université Paris-Est, EYCOM, ESIEE Paris*
Yves Louet - *Supelec Rennes, IETR, UMR 6164*
Fabien Robert - *ST Ericsson et ESYCOM, ESIEE Paris*
Fabio Epifano, Philippe Cathelin, Pascal Trialre - *ST Ericsson*

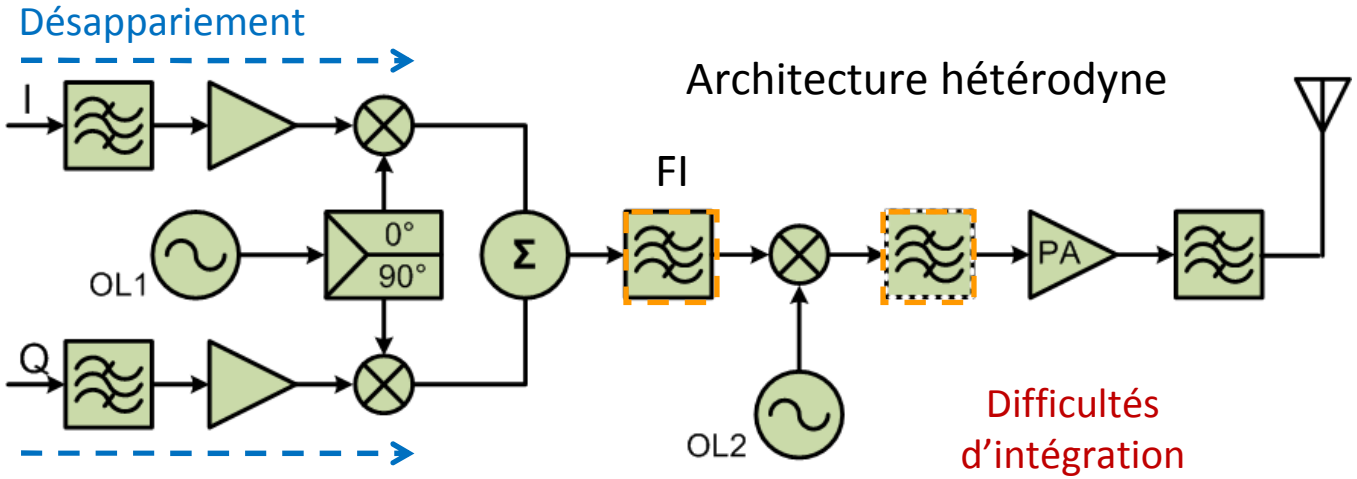
ESYCOM
Electronique, Systèmes de Communication et Microsystèmes

Plan

- **Impact de l'évolution des systèmes** et normes de communications mobiles sur les architectures d'émetteurs
- **Généralités sur les émetteurs** : Influence de l'amplificateur de puissance, critères de qualité d'un émetteur, considérations matérielles et technologiques.
- **Architectures d'émetteurs**
  - Analogiques classiques et à amélioration de rendement
  - Traitement du signal dans les émetteurs
  - Architectures échantillonnées
  - Architectures numériques
- **Conclusion**

Architectures analogiques classiques

Architecture hétérodyne

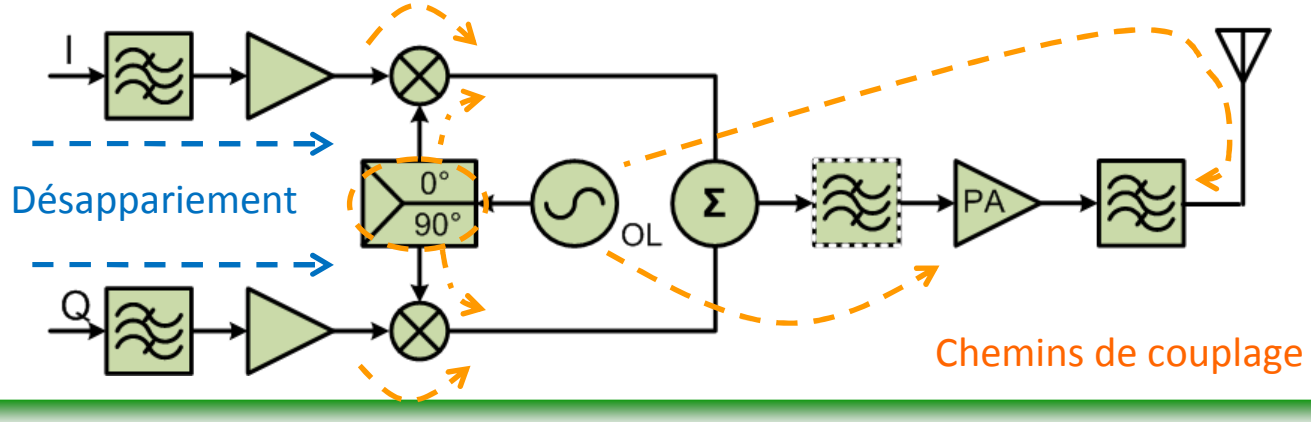


Qualité du signal,
pas de Couplage
Nbr composants,
Intégration diffiicile,
Consommation

PA linéaire à faible rendement

Traitement analogique/RF

Architecture homodyne, à conversion directe



Simple, flexible
Couplage,
calibration

Contexte et perspectives

- **Aujourd'hui** : technologies OFDM/MIMO pour les systèmes 4G et au-delà
  - Licences 4G en France nov. 2011 (100Mbps) → traffic internet haut débit x10 en 2 ans.
  - **Loi de Cooper** (ancien VP de Motorola, PDG d'ArrayComm) :
  - Capacité de communications radio depuis Marconi (1895) (nb de com. possibles en un lieu sur tout le spectre utile)
    - **x2 tous les 30 mois**.
- **Le futur** : la capacité visée : 1 Gbps/Km2 nécessite
  - de **nouveaux concepts** :
    - Radio cognitive (J. Mitola)
    - Radio docitive (M. Dohler)
  - Des **architectures et des technologies d'émette** capables de les supporter.



Radio cognitive et radio logicielle

J. Mitola 1999 - 1995

Intelligence dans les terminaux et le réseau :

✓Perception de l'environnement, du contexte :

- ✓ Exploration du spectre, détection de bande libre, estimation du canal, localisation
- ✓ Prise en compte de l'utilisateur

✓Décision et action : adaptation à l'environnement : utilisation opportuniste du spectre, sélection dynamique de fréquence, modulation adaptative, contrôle de la puissance de transmission (TPC), protocole

✓Capacité d'apprentissage et de reconfigurabilité

✓Coopération intra et inter réseaux

Technologies de **radio logicielle large bande**

✓SWR : software radio

- Numérisation à l'antenne
- Reprogrammable

✓SDR : restreinte

- Numérisation en FI
- Reprogrammable

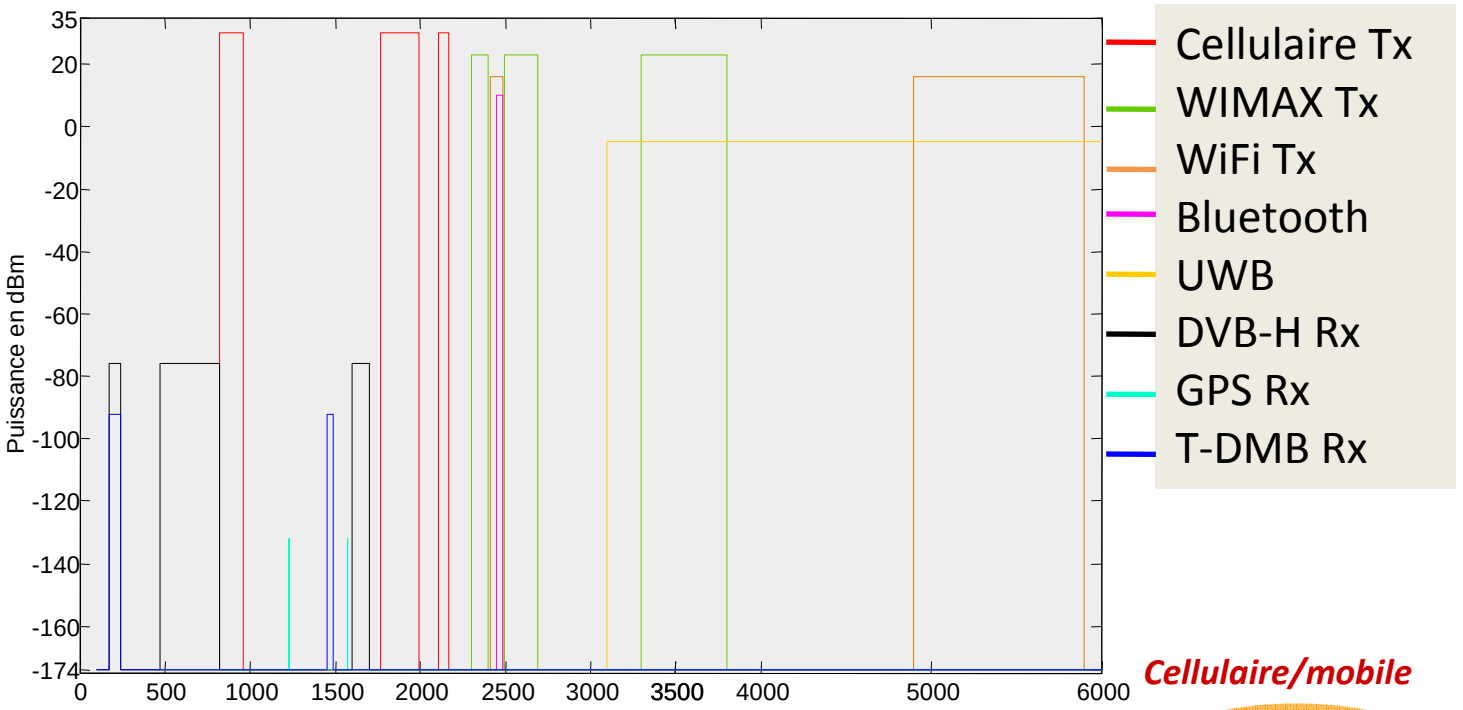
✓Radio numérique

- Numérisation en FI
- Non reprogrammable

Impact sur les E/R radios

- Processeur bande de base puissants et optimisés en consommation
- Émetteurs-récepteurs radios :
  - Multi-services, éventuellement simultanés : interopérabilité.
  - Multi-standards, multi-bandes.
  - Supportant une grande diversité de formes d'onde.
  - Large bande (éventuellement canaux disjoints), gestion de canaux fréquentiels multiples.
  - Accès multi-utilisateurs et contrôle de puissance.
  - Reconfigurables (ampli, filtre, changement de fréquence), reprogrammable, adaptatifs.
  - Autonomie en énergie.
  - Multi-antennes.
  - Faibles coût et dimensions : intégrabilité (→numérique), intégration des passifs et des capteurs. Et faible time to market.

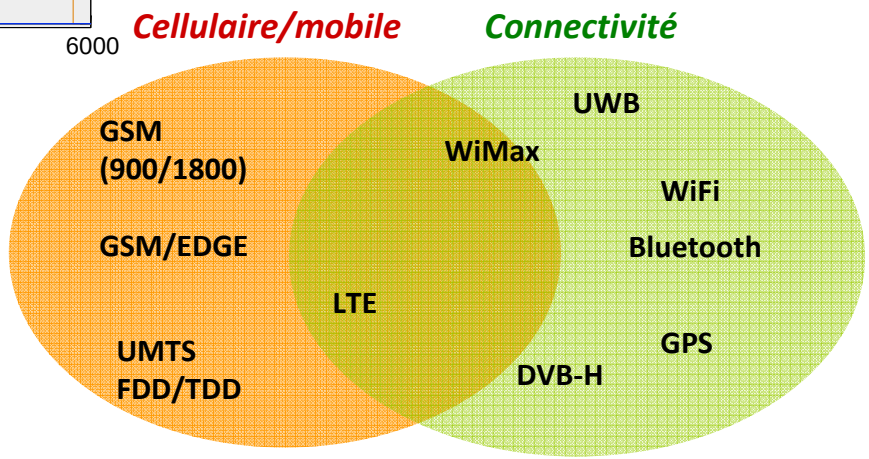
Diversité des interfaces air pour un mobile



Bande des standards en émission :
15 à 200 MHz
Largeur des canaux :
0,2 à 20 MHz
Fréquences les plus fréquentes :
600 à 6GHz

Modulations, accès multiples, duplex

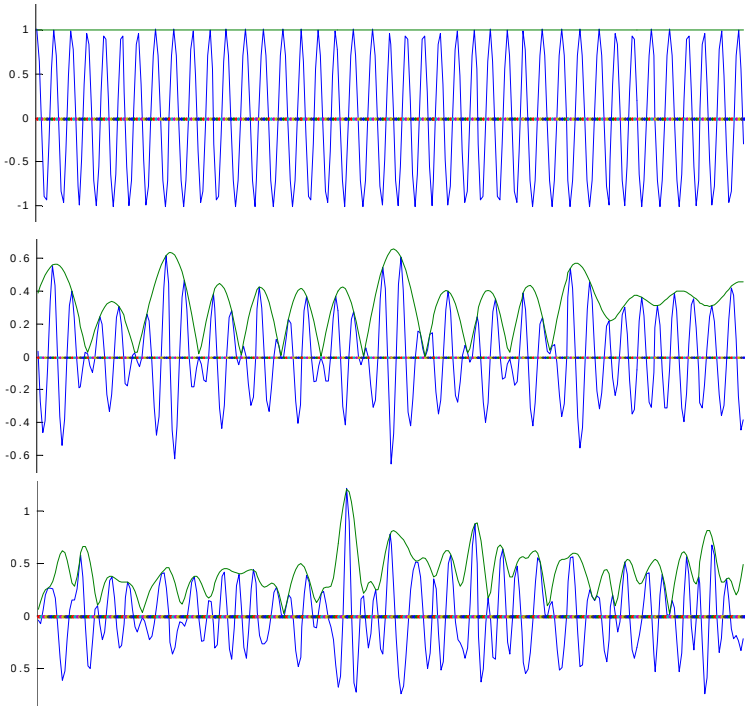
- FM, AM
- GMSK, MPSK, MQAM
- OFDM, OFDMA +MIMO
- DS-SS, FH-SS
- FDMA, TDMA, CDMA, CSMA/CA
- TDD, FDD, H-FDD



Dynamique de l'enveloppe : PAPR et contrôle de puissance moyenne

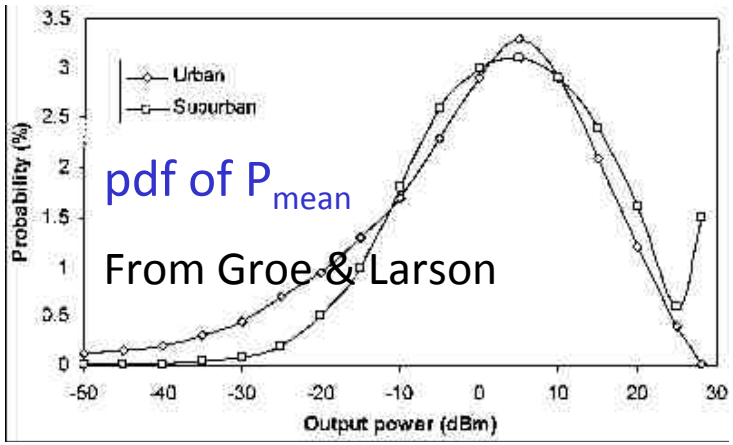
Dynamique de l'enveloppe instantanée

$$PAPR = 10\log\left(\frac{P_{max}}{P_{mean}}\right)$$

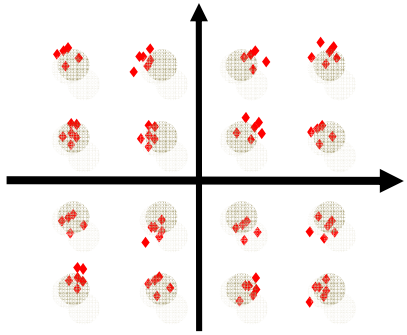


PAPR effectif : de 0 à 13 dB aujourd'hui

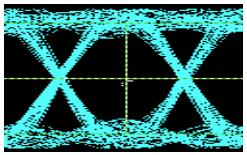
Le contrôle de puissance adapte la puissance moyenne du signal (distance, …).
Critique pour le CDMA pour minimiser interférences MUI (near far effect).
74dB (-50 à 24 dBm) en WCDMA



Critères de qualité des signaux transmis : EVM, ACPR, bruit

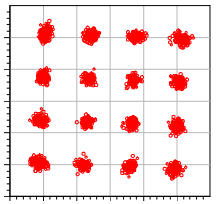


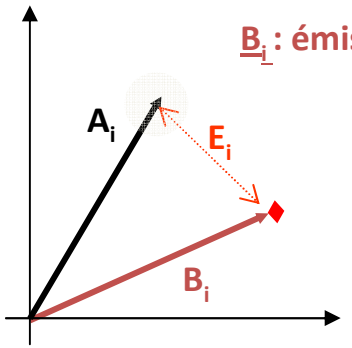
EVM
Error Vector Magnitude



QPSK eye and 16-QAM for 3% EVM (rms)

- WiFi (25 Mbps)	-16 dB	15 %
- WiFi (54 Mbps)	-25 dB	5.6 %
- WiMAX (64-QAM)	-30 dB	3.1 %
- LTE (16-QAM)	-18 dB	12.5 %
- GSM/EDGE	-20 dB	10 %
- UMTS (QPSK)	-15 dB	17.5 %

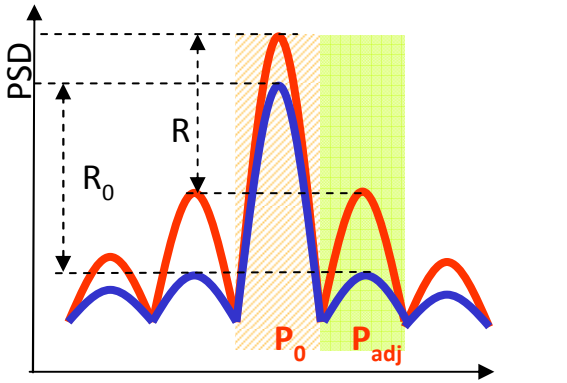




B_i : émis A_i : Ideal E_i : Erreur Vectorielle

$$EVM_{rms} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|A_i - C_1 B_i - C_0\right|^2}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|A_i\right|^2}}$$

ACPR
Adjacent Channel Power Ratio



	400kHz	5MHz	10MHz
GSM/EDGE	60 dB		
WCDMA		33dB	43dB

$$ACPR = \frac{P_0}{P_{adj}} = \frac{\int_{P_0} dsp(f)\,df}{\int_{P_{adj}} dsp(f)\,df}$$

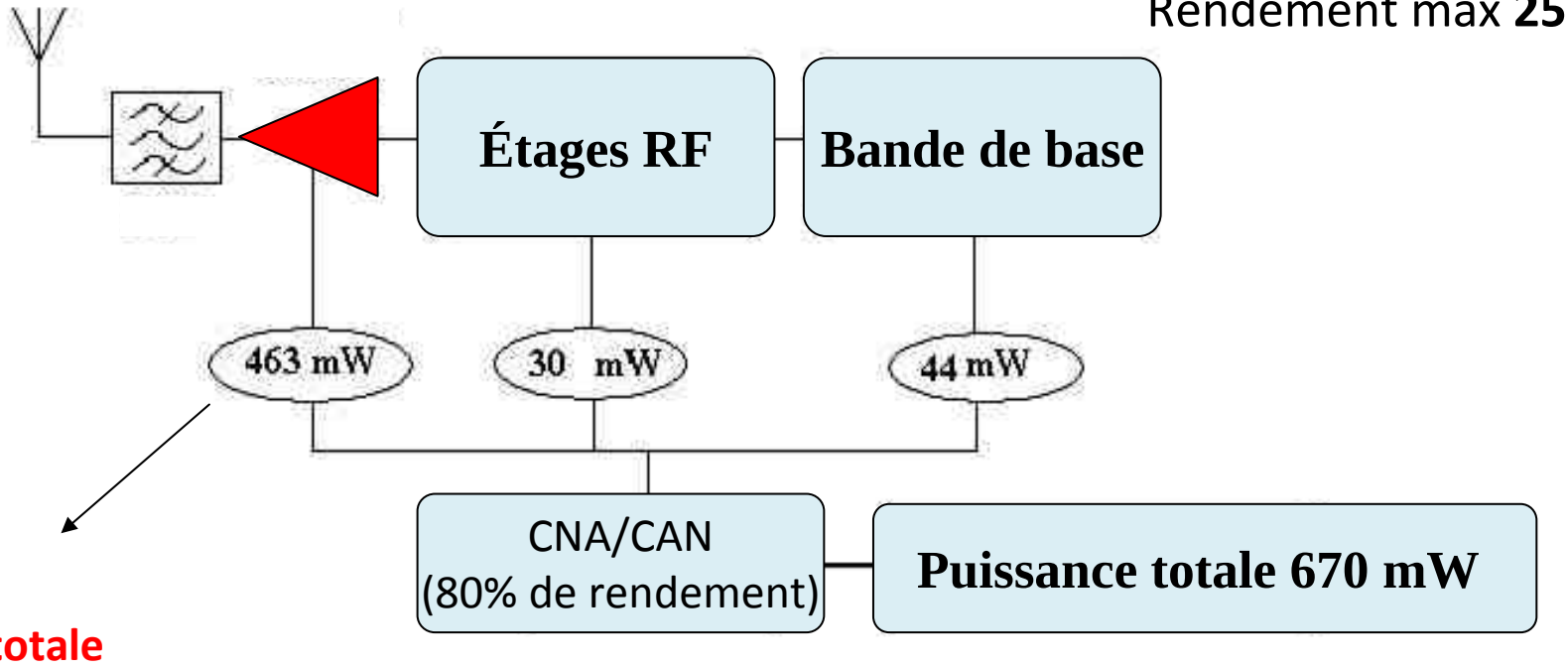
Bruits : conversion, de phase oscillateurs, répliques d'échantillonnage, images

Influence de l'amplificateur de puissance

60-70 % de la consommation d'un terminal 2.5 G est due à l'amplificateur de puissance

Pour PAPR = 10dB
Et ampli classe A
Rendement **5%**
Ampli classe B
Rendement max **25%**

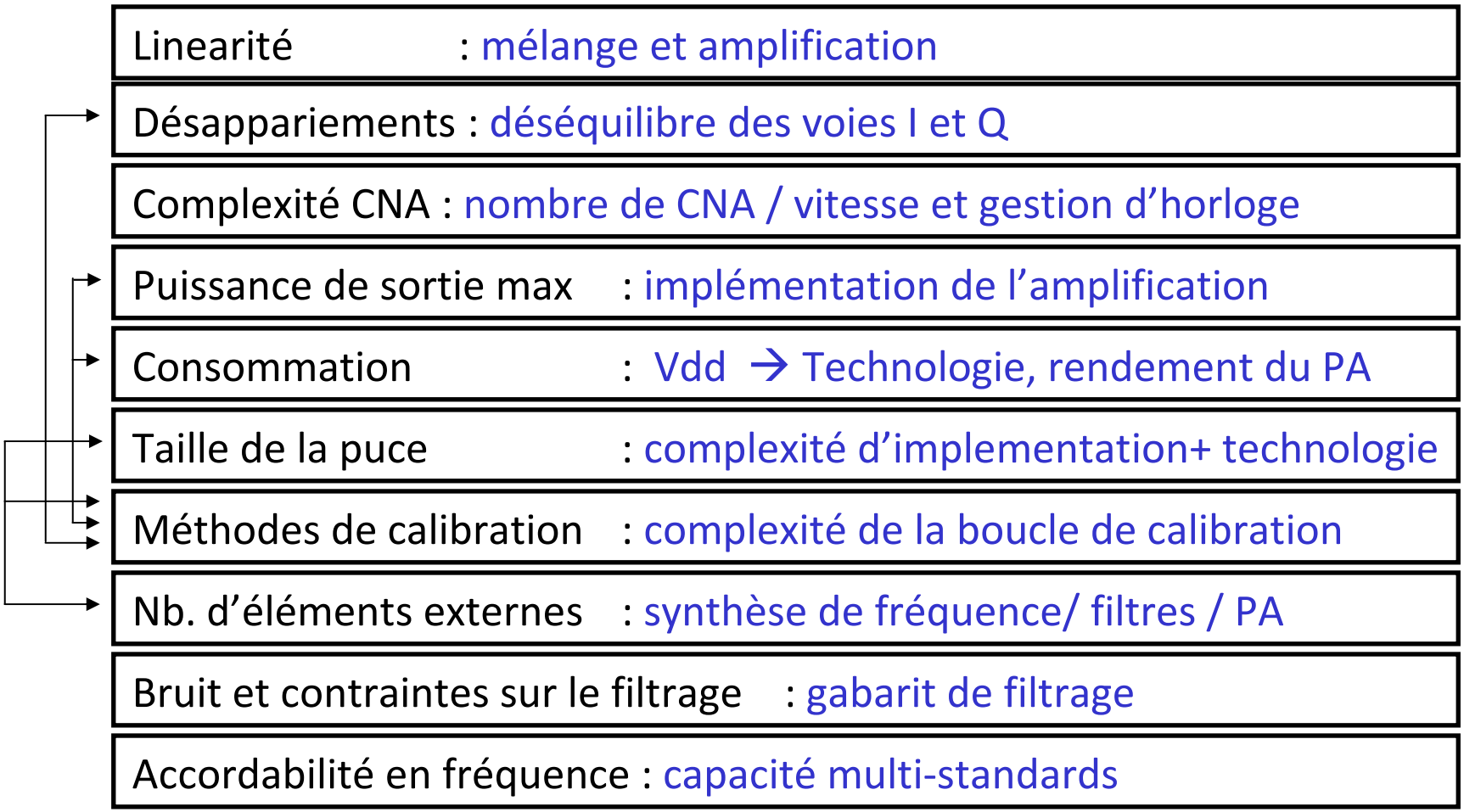
PA (Power Amplifier)



70% de la puissance totale

18/05/2011 Numérisation des émetteurs 10

Conception d'architecture : critères liés à l'implémentation



Réduction d'échelle de la technologie Silicium

- Objectif : bande de base et RF dans un SOC
- CMOS optimisé pour traitements numériques, performances médiocres en analogiques et RF
- Conception doit être reprise à chaque nouvelle génération technologique
- Baisse des tensions d'alimentation : complique la génération de niveaux puissance élevés
- Mais augmentation de la vitesse de commutation des transistors et de leur densité →concevoir des traitements qui tirent profit de ces caractéristiques.

Architectures analogiques d'émetteurs RF mobiles

Cartésienne $z(t) = z_I(t) + jz_Q(t)$ **Polaire** $z(t) = A(t)e^{j\Phi(t)}$

Architectures classiques

- Architectures cartésiennes classiques :
  - hétérodyne, homodyne.
- Architectures polaires :
  - boucle de synthèse modulé

CNA en bande de base

Architectures visant à améliorer rendement et/ou linéarité

- Polarisation dynamique, suivi d'enveloppe …
- Utilisant la décomposition des signaux : enveloppe constante
  - EER, LINC, …

18/05/2011 Numérisation des émetteurs 13

Numérisation des architectures

Architectures RF analogiques
Améliorées par traitement numérique du signal

CNA en bande de base avec fe augmentée

Architectures RF échantillonnées à amplificateur commuté
Polaires ou cartésiennes.
Filtrage RF pour reconstituer le signal

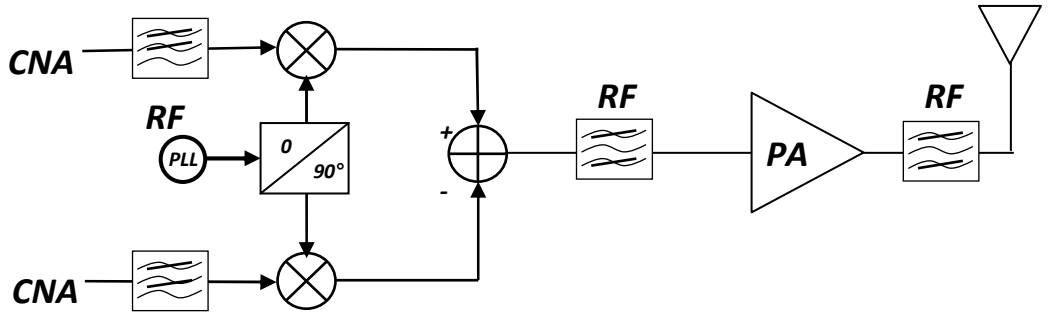
Codage des signaux PWM, ΣΔ

Architectures RF numériques à PA quasi-linéaire
Numérisation des blocs fonctionnels
CNA juste avant le PA.

CNA RF : RFDAC

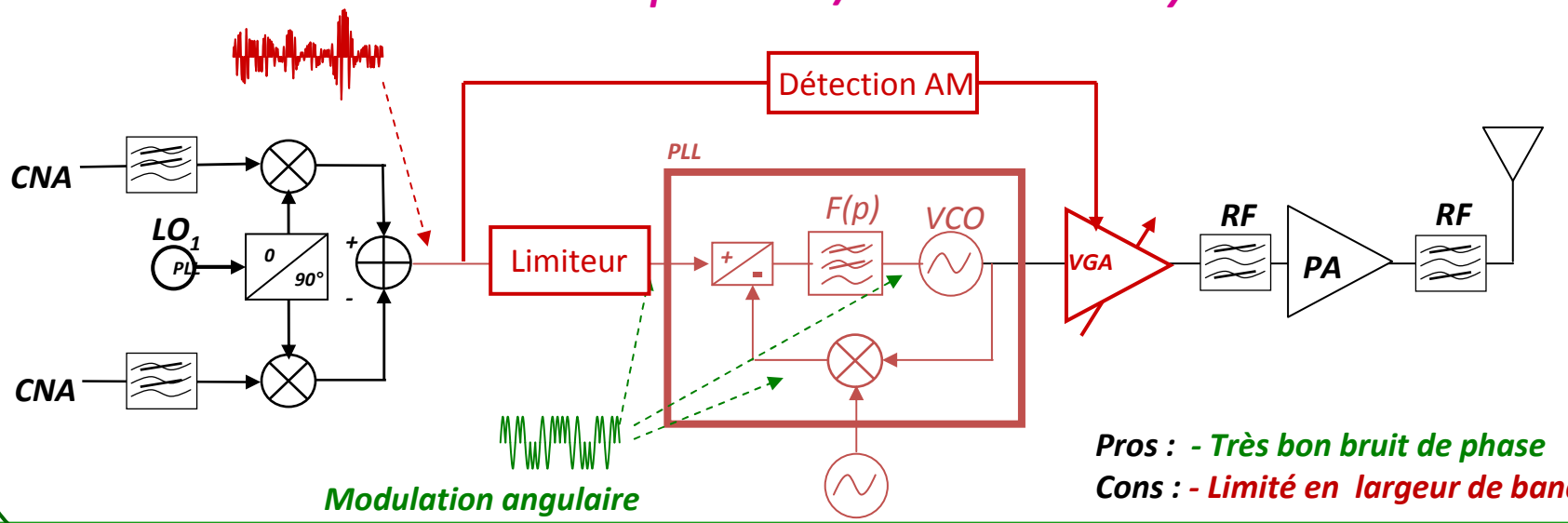
Architectures analogiques classiques

Cartésienne à conversion directe



Simple,, flexible
Couplage,
calibration

Polaire pour GSM/EDGE. Boule de synthèse modulée



Modulation angulaire

Pros : - Très bon bruit de phase
Cons : - Limité en largeur de bande

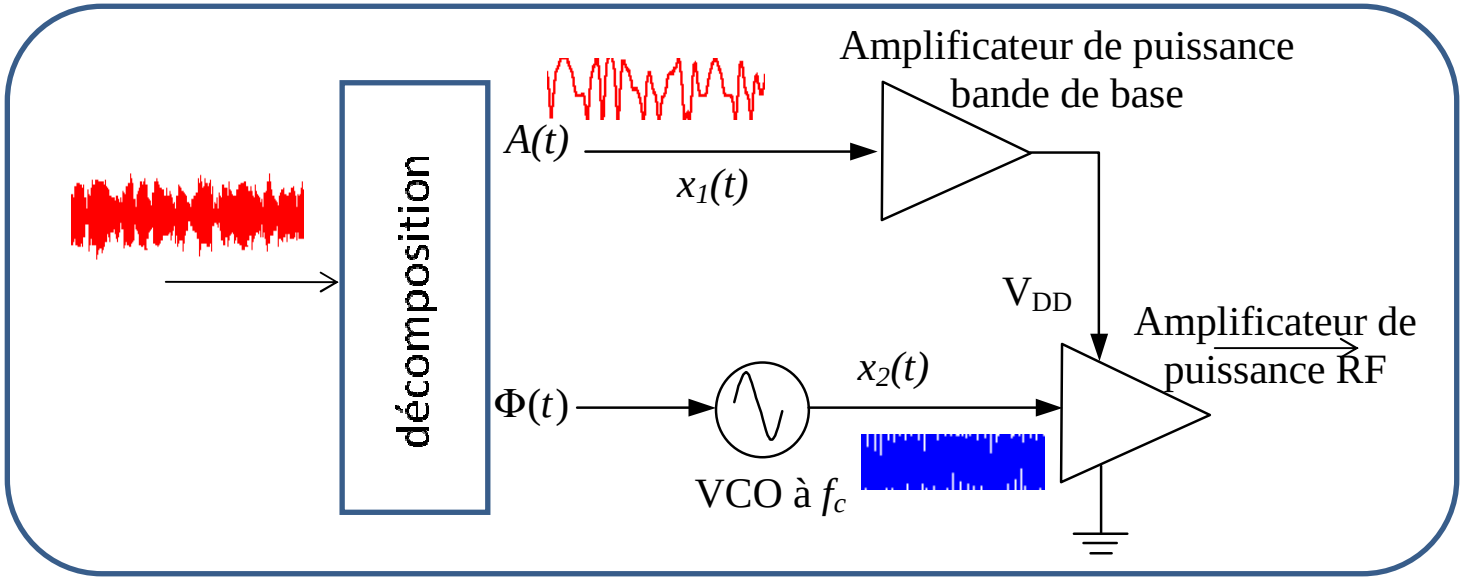
Architectures visant à améliorer le rendement

- Bon rendement sur une grande plage de puissance moyenne :
  - Polarisation dynamique (grille, drain)
  - Suivi d'enveloppe (PA linéaire), modulation de drain
- Bon rendement malgré une grande variation de l'enveloppe instantanée du signal (PAPR)
  - Décomposition et recomposition du signal
    - EER
    - LINC (outphasing), CALLUM
  - Variation de la charge : Doherty (dans les stations de base)

Architectures à décomposition/recomposition

EER, Kahn

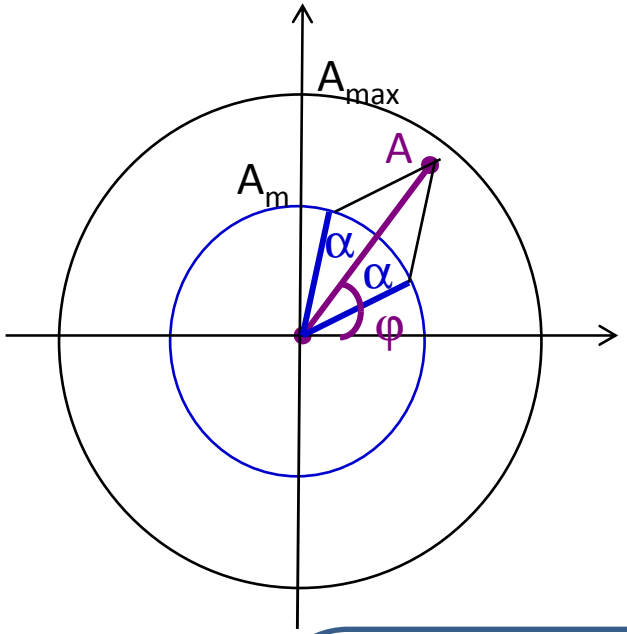
$$x(t) = x_1(t)x_2(t). \quad x_1(t) = A(t), \quad x_2(t) = \cos\left(\omega_c t + \Phi(t)\right).$$



Architectures à décomposition/recomposition

Signaux RF à enveloppe constante

LINC

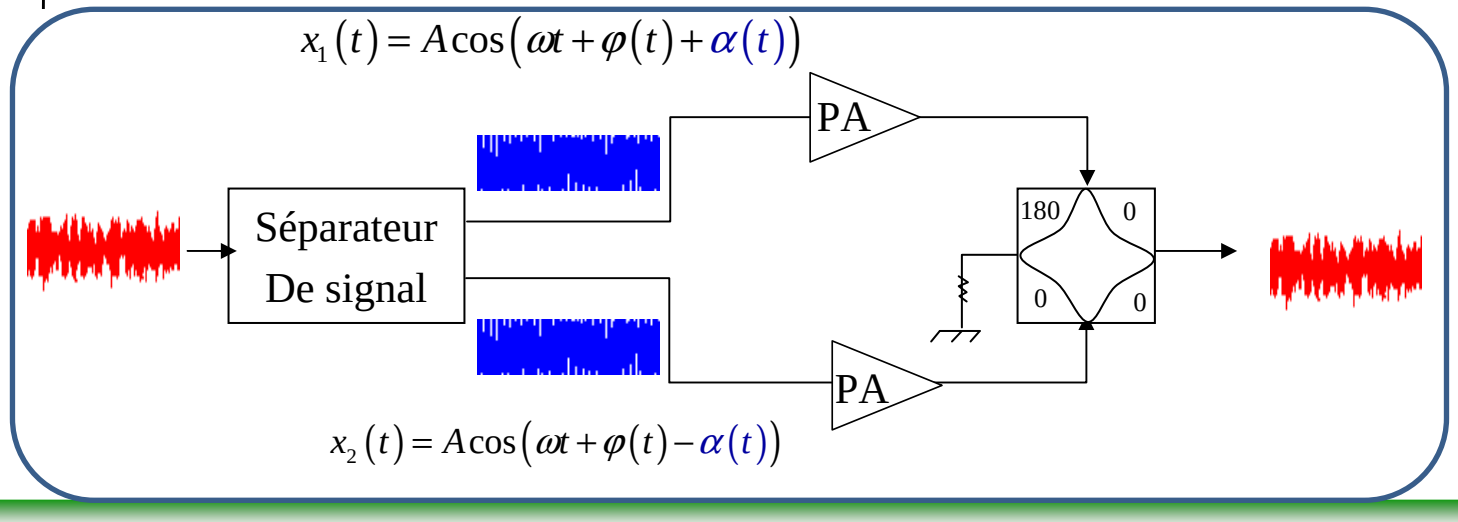


$$x(t) = A(t)\cos\left(\omega t + \varphi(t)\right)$$

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t)$$

$$x_{1,2}(t) = A_m \cos\left(\omega t + \varphi(t) \pm \alpha(t)\right)$$

$$\cos\left(\alpha(t)\right) = \frac{A(t)}{2A_m} = \frac{A(t)}{A_{\max}}.$$

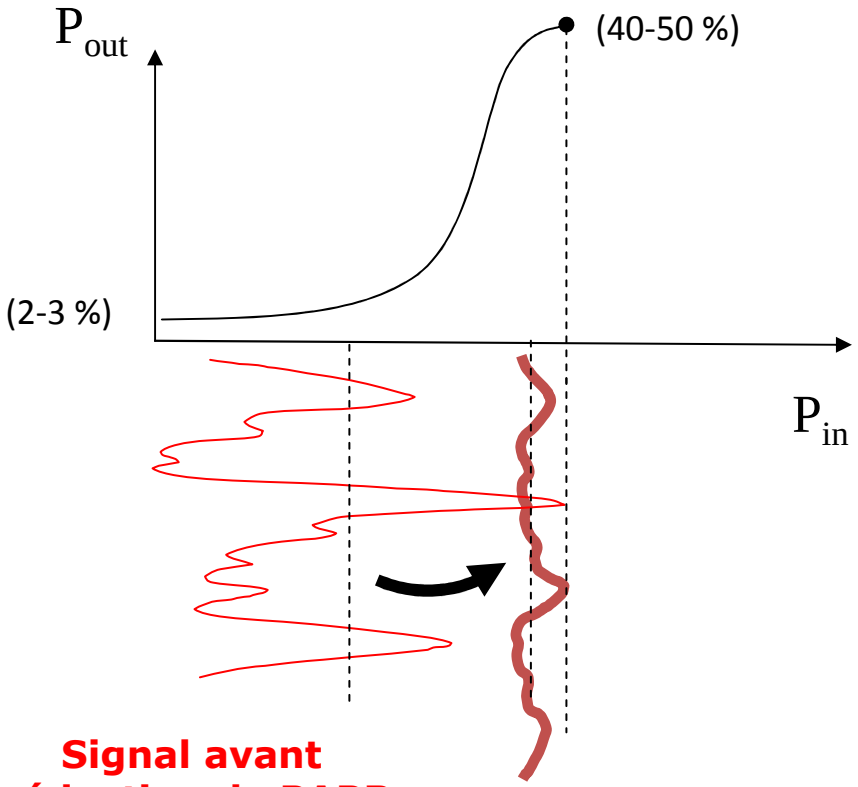


Architectures analogiques améliorées par traitement numérique du signal

- Corrections des défauts de l'analogique :
  - Correction des déséquilibres des voies I et Q
  - Linéarisation par prédistorsion numérique
- Transformation des signaux pour alléger la tâche de l'émetteur
  - Compression du PAPR

Intérêt de réduire le PAPR

Courbe de rendement



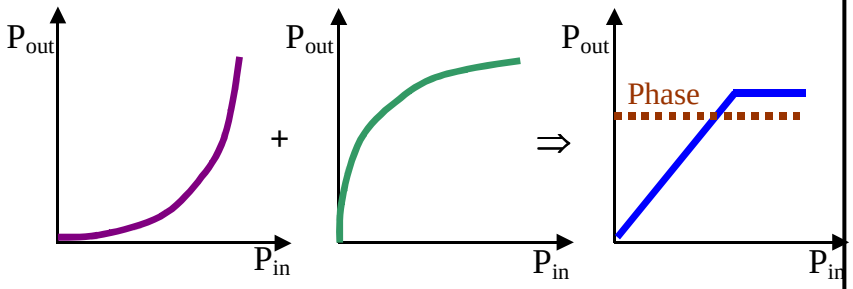
Signal avant réduction de PAPR

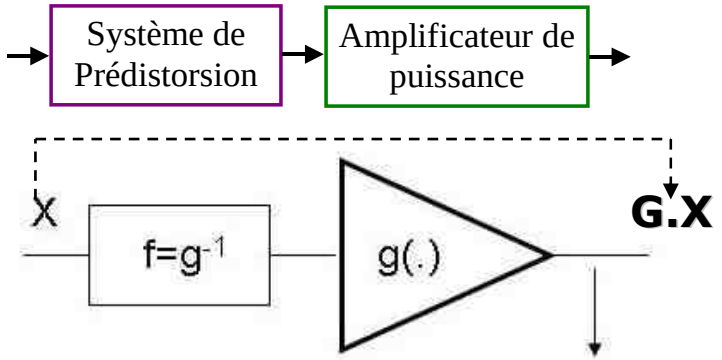
Signal après réduction de PAPR

avoir de meilleurs rendements

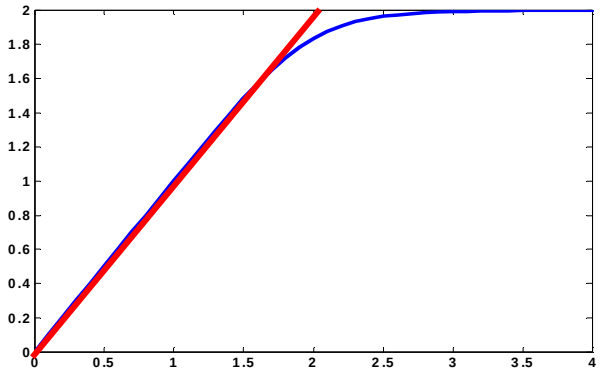
plus grande puissance de sortie

Intérêt de linéariser





linearization of the amplifier

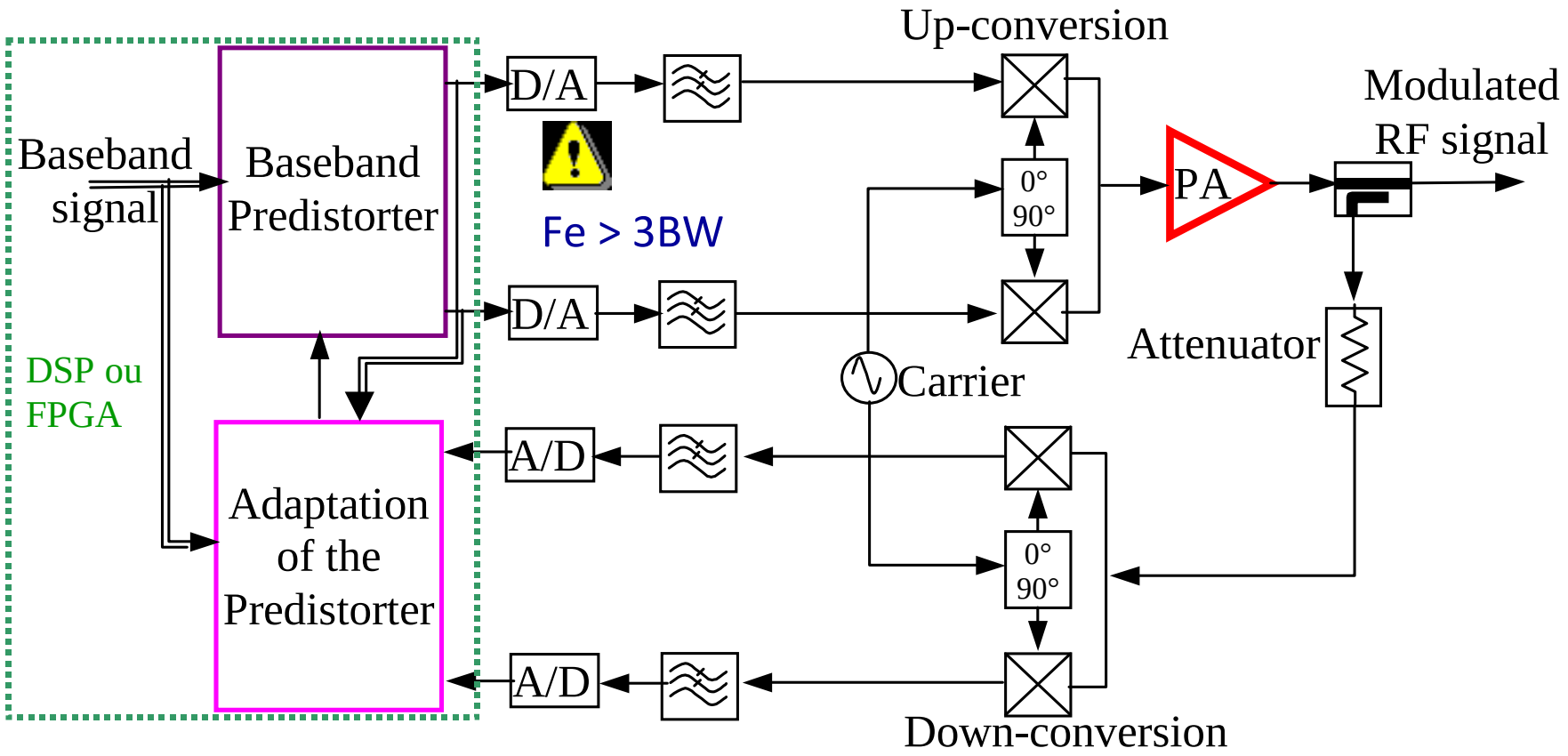


avoir une relation linéaire entrée/sortie (améliorer EVM, BER, ACPR

Les méthodes de réduction du PAPR

- Facteurs discriminants :
  - capacité de réduction du PAPR
  - dégradation du taux d'erreurs
  - dégradation du débit utile (nécessité d'envoi d'information extrinsèque)
  - augmentation de la puissance moyenne
  - complexité de la méthode
  - modification du récepteur (notion de compatibilité descendante)
- Méthodes les plus rencontrées :
  - Clipping, Tone Reservation, Active Constellation Extension, Selected Mapping

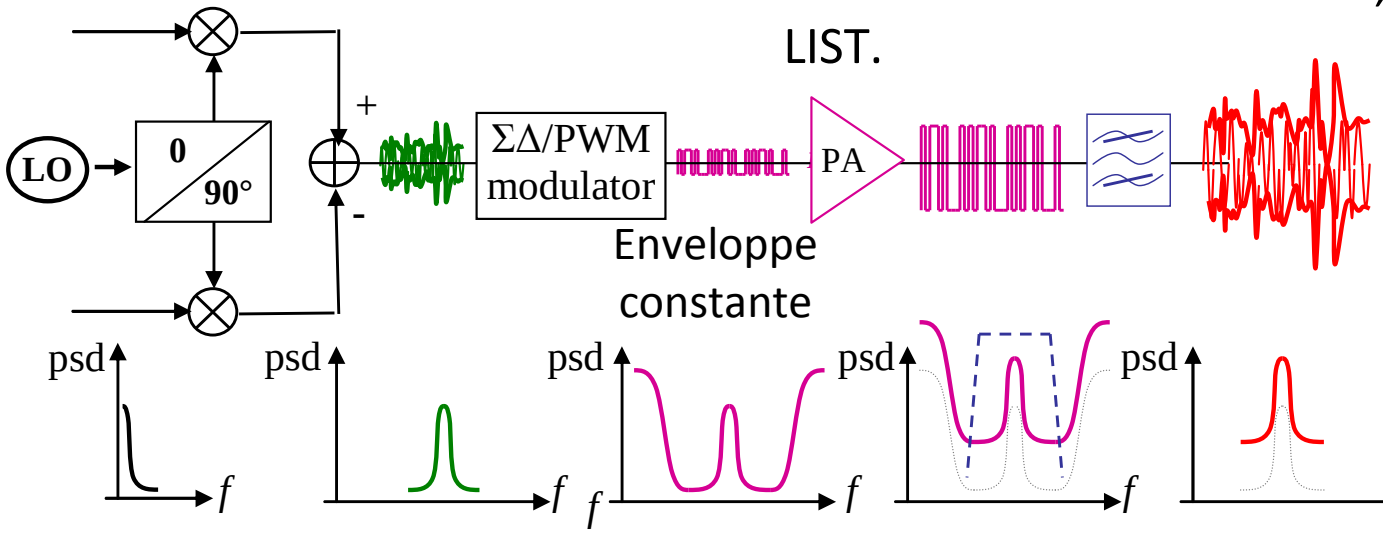
Prédistorsion numérique en bande de base



18/05/2011 Numérisation des émetteurs 22

Principes des architectures échantillonnées à enveloppe constante et PA commutée

Précurseurs : Raab RFPWM, Cox LIST.

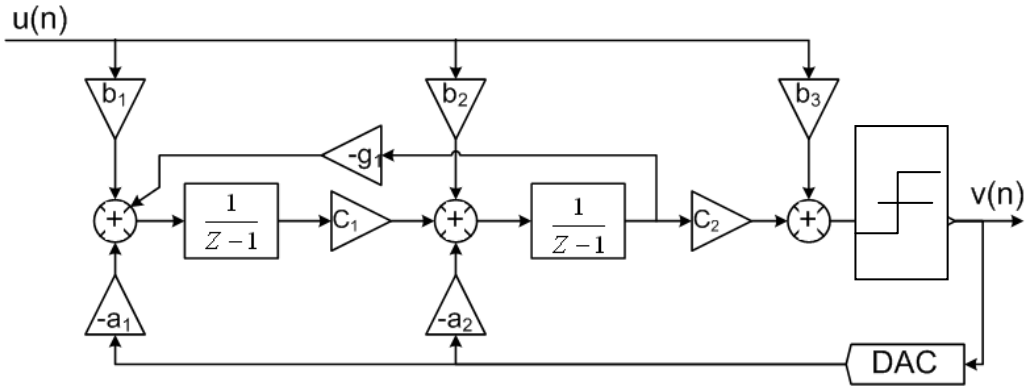


Codage du signal RF sur 1 bit +/- 1 : signal RF ou Bande de base puis transposition.
→ Signal à enveloppe constante → PA commuté
Filtre passe-bande RF de reconstruction du signal et filtrage du bruit.
Codage PWM ou sigma-delta : suréchantillonnage

Rendement global fonction de :
rendement du PA x **efficacité de codage**

Qualité du signal reconstruit fonction de :
Fe, Filtre de reconstruction

Modulateur ΣΔ (1 Bit)

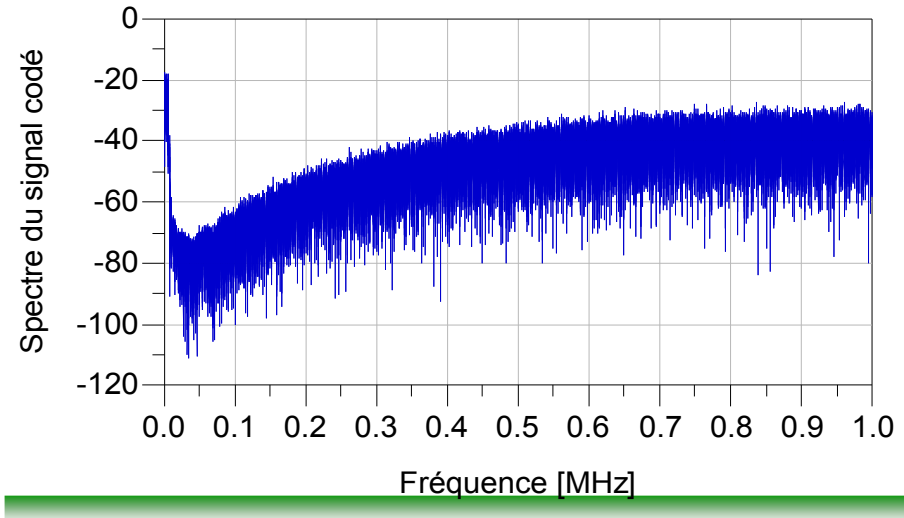


Limites de la fréquence d'échantillonnage des codeurs ΣΔ 1 bit ≈ 8 GHz.

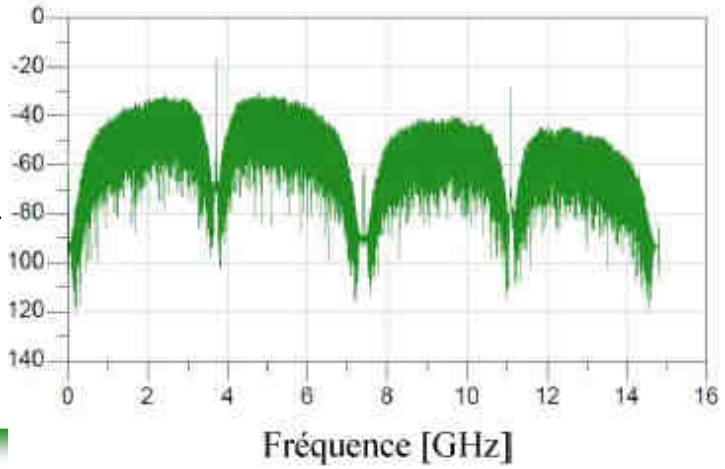
Passe-bas ou passe-bande.
ΣΔ passe-bas appliqué à l'enveloppe complexe puis transposition en fréquence.

Spectre en sortie

Efficacité de codage

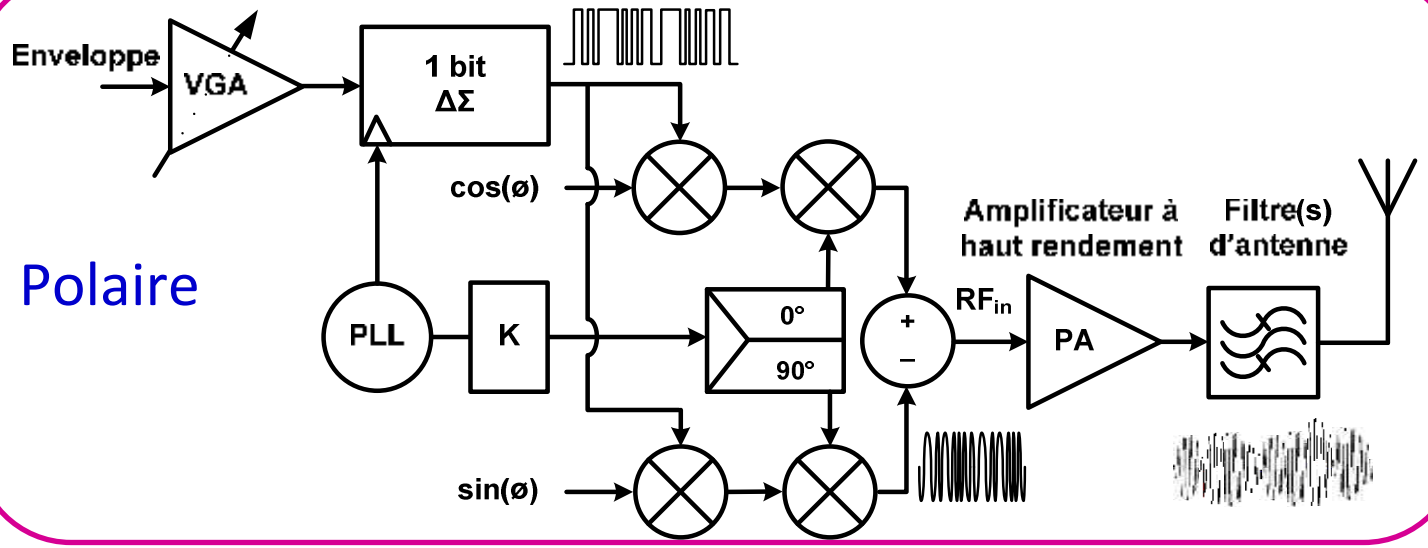


$$f_{\Sigma\Delta} = \frac{2 f_c}{n}$$

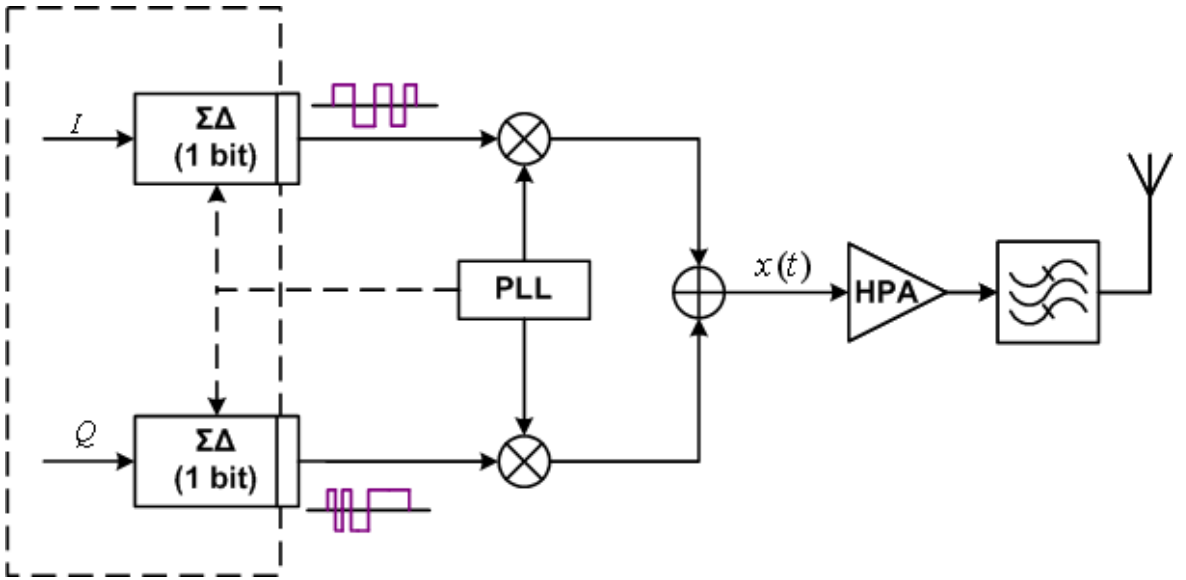


Architectures avec codage ΣΔ passe-bas

Polaire



Cartésienne



Comparaison PWM, ΣΔ, polaire, cartésien

Classe E :

Inductance série.

GaAs E-PHEMT

η_D = 86.4%

Gain = 10.1 dB

fc = 3,7 GHz

WiMAX Mobile

Bande 200 MHz

Canaux 10MHz

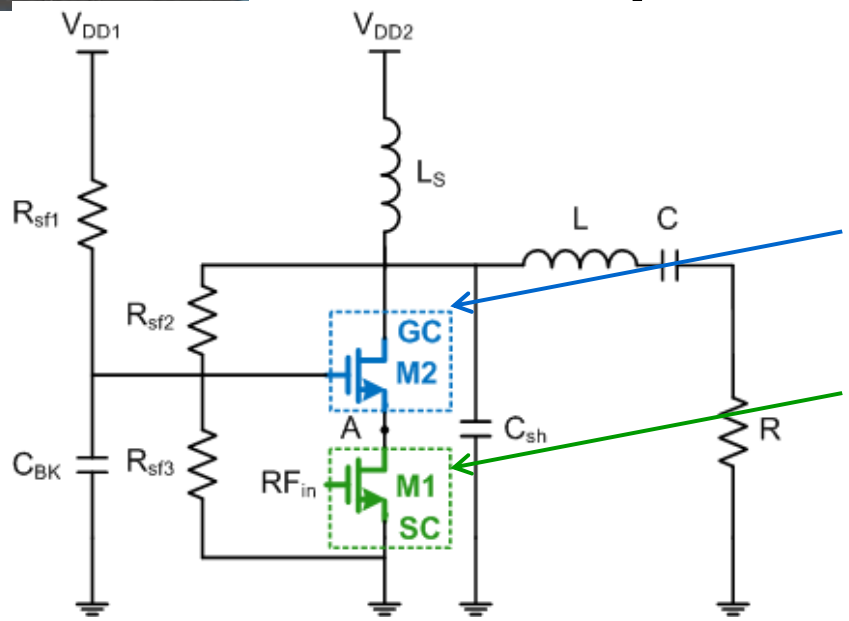
OFDM 1024

	EVM
Polaire PWM	5.12 %
Polaire SD	1.38 %
Cartésienne SD	3.30 %

Paramètres	***Polaire PWM***	***Polaire ΣΔ***	***Cartésienne ΣΔ***
Pin totale	8.3 dBm	8.3 dBm	8 dBm
Pout totale	15.2 dBm	11 dBm	10.5 dBm
Rend. Drain	68.0 %	40.4 %	31.0 %
PAE	55.1 %	20.4 %	13.5 %
Rend. Global	60.3 %	33.7 %	26.4 %
Gain Global	7.2 dB	2.7 dB	2.5 dB

Thèse de M. Suarez, Architectures d'émetteurs pour des systèmes de communication multi-radio, Déc. 2009

Ampli classe E 3,7 GHz

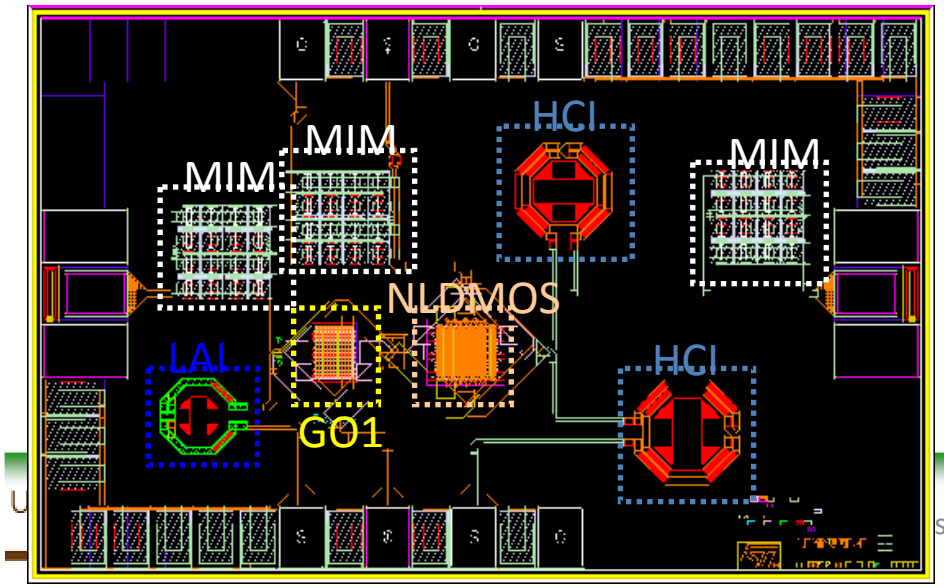


Technologie ST Microelectronics HCMOS9SOI

Transistor en grille commune à forte BV_{DS}
NLDMOS,
BV_{DS} = 14V ⟶ V_{DD} ≤ 14/3,56 = 3,9 V

Transistor en source commune à
capacité C_{DS} réduite et f_T élevée
MOSFET à couche d'oxyde amincie
fT = 150 GHz ⟶ fC ≤ 150/10 = 15 GHz

Plan de masse :Taille : 1,57 x 1 mm = 1,57 mm^2



η = 61,12%
PAE = 60,81%
Gain = 16,89 dB
Pout = 22,89 dBm

L. Andia, D. Belot, M. Villegas, G. Baudoin, "A Highly Efficient Reconfigurable 130nm CMOS-SOI RF Power Amplifier forMulti-Radio Emitter," , APMC 2010.

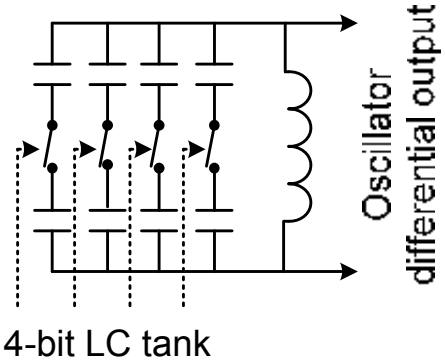
Remplacement des blocs analogiques par des blocs numériques

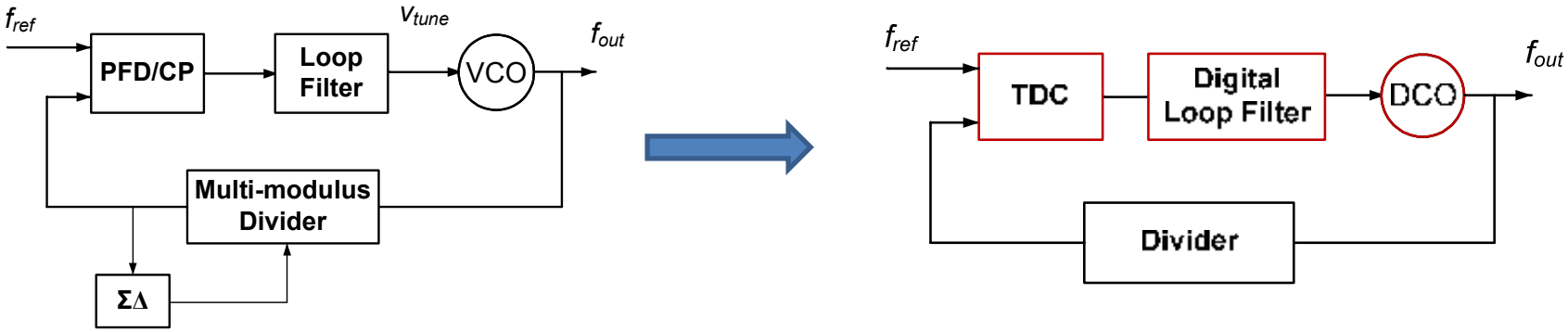
- 1 bloc numérique remplace 1 bloc numérique ou une agrégation de plusieurs blocs analogiques
- La place du CNA remonte vers l'antenne.
- Blocs substitués :
  - Synthèse de fréquence : ADPLL
  - Mélange et conversion CNA :
    - DRFC (Digital to RF conversion), RFDAC, DDRM (Direct Digital to RF Modulator)
  - Mélange et amplification

Synthèse de fréquence : ADPLL

Time-to-Digital Converter (TDC) : sortie proportionnelle à la différence de temps entre les fronts de la référence et de la voie de retour.

Digital Controlled oscillator (DCO) : contrôlé par commutation de capacités (attofarads)



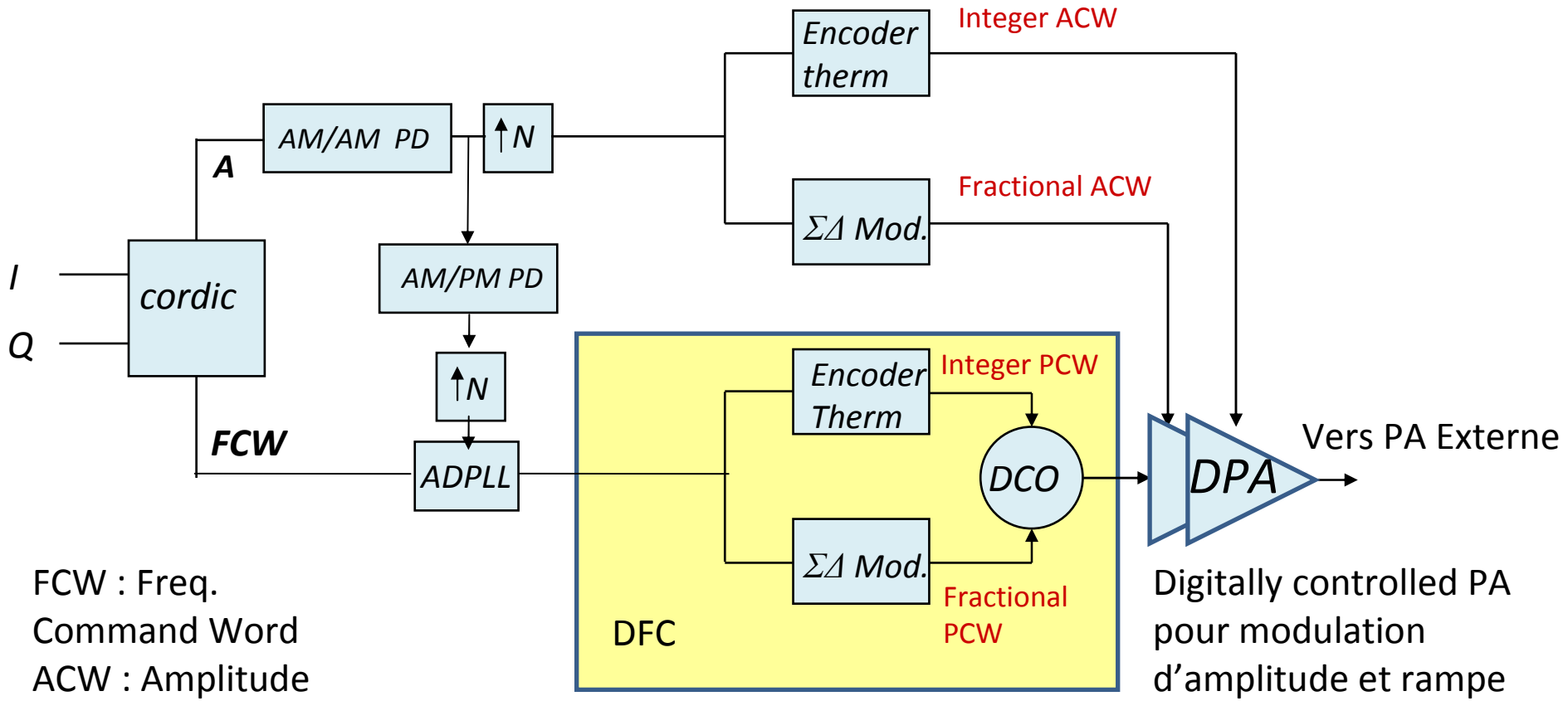


Avantages : integrabilité, reconfigurabilité, faible sensibilité au process (PVT), faible consommation.

Défauts : génération de spurs, bruit de quantification du TDC.

R. B. Staszeswski and P. T. Balsara, "Phase–-Domain All–Digital Phase–Locked Loop," IEEE trans. on circuits and System, vol. 52, no. 3, pp. 159–163, March 2005.

Émetteur polaire numérique (GSM/EDGE) émetteur-récepteur mono-chip



FCW : Freq. Command Word
ACW : Amplitude commande Word

Limité en BW (cordic), polaire, boucle modulée.

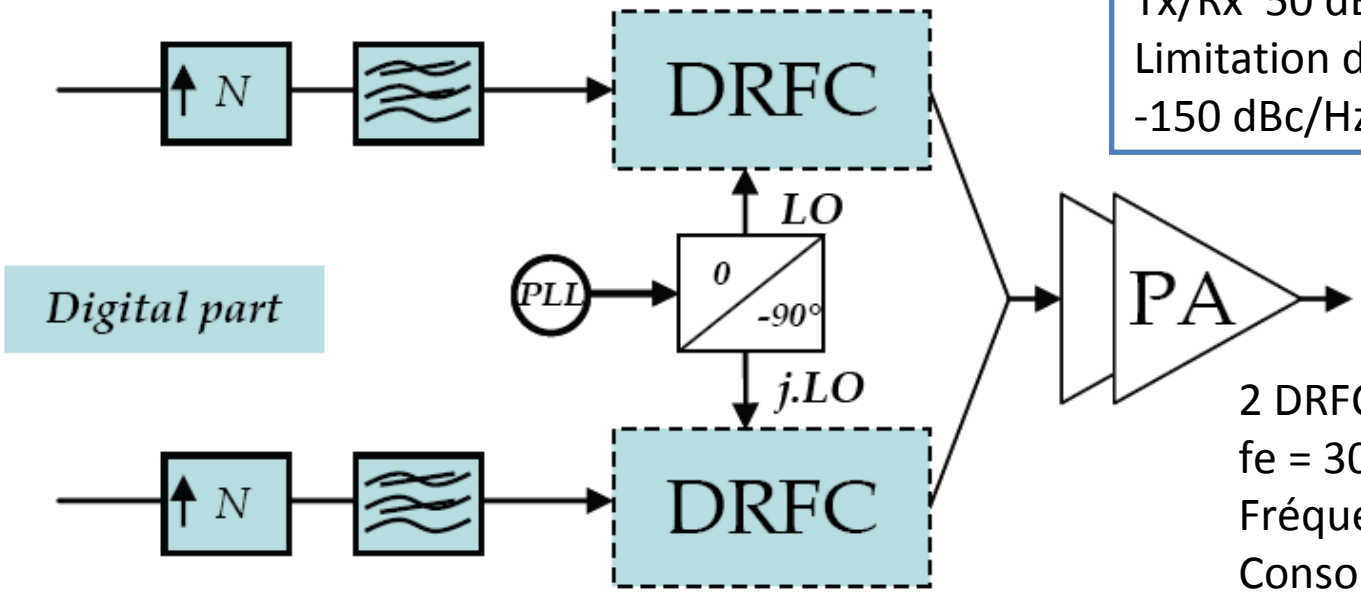
Digitally controlled PA pour modulation d'amplitude et rampe de puissance

Texas-Instruments

R. B. Staszewski et al, **All-digital PLL and transmitter for mobile phones** IEEE Journal of solid-state circuits, VOL. 40, NO. 12, 2005

DDRM : Direct-Digital RF-Modulator

WXDMA : Duplexeur FDD isolation Tx/Rx 50 dB at 190 MHz.
Limitation du bruit sortie du PA à -150 dBc/Hz (filtre)



2 DRFC 10bits
fe = 307,2 MHz
Fréquences : 1,9 à 2,4 GHz
Consommation < 100 mW

DRFC combine fonctions de CNA, mélangeur, contrôle de puissance.

Nokia - STMicroelectronics

Eloranta, P.; Seppinen, P.; **Direct-digital RF-modulator IC in 0.13 µm CMOS for wideband multi-radio applications** ISSCC 2005

Eloranta, P.; Seppinen, P.; Parssinen, A.;**Direct-digital RF-modulator: a multi-function architecture for a system-independent radio transmitter** IEEE Vol 46, Issue 4, Apr 2008

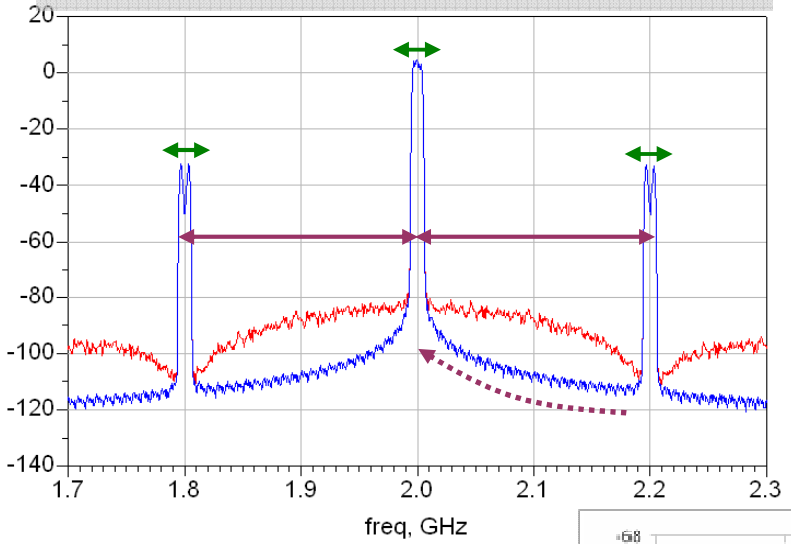
Bruit lié aux répliques

Répliques dues à l'échantillonnage

Niveau des répliques dépend de 2 param.

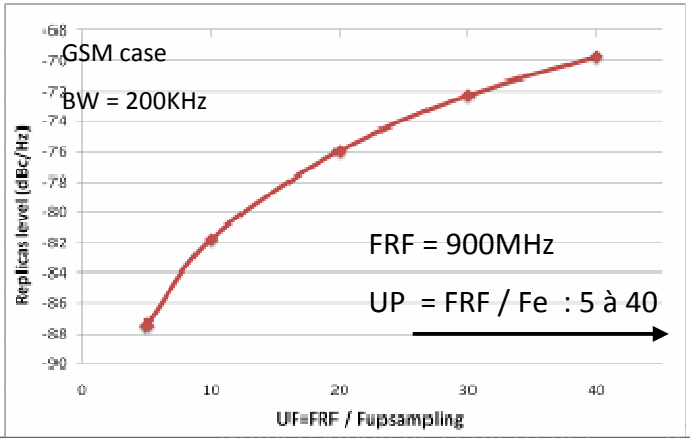
Largeur de bande du signal (dépend du standard) 200KHz – 20MHz

Impacte l 'atténuation des répliques par les zéros du sinc du bloqueur d'ordre 0.



Ratio FRF/Fe règle la distance repliques/LO

Le niveau des répliques suit la pente

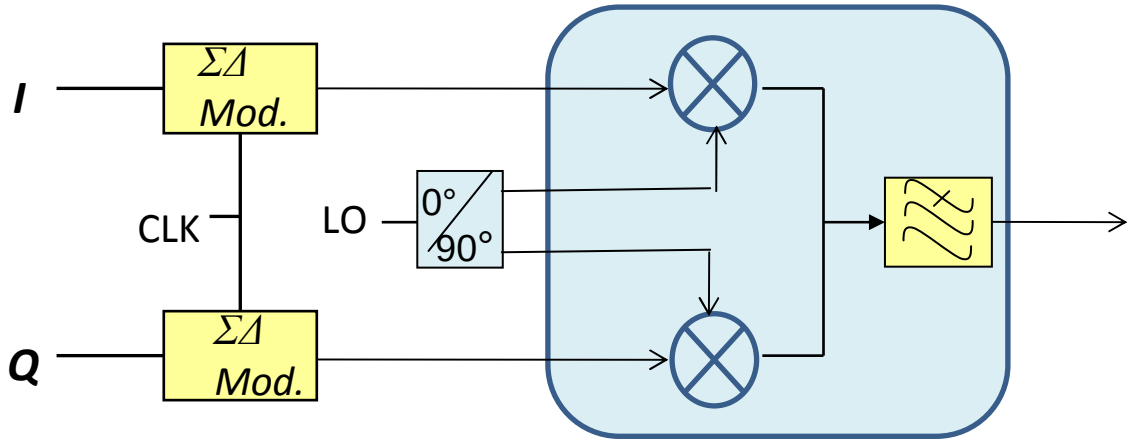


BW signal	1ère réplique (dBc/Hz)	2ème réplique (dBc/Hz)
20MHz	-33,71	-39,79
10MHz	-40,39	-46,41
5MHz	-47,66	-53,42

Nécessité: filtrer ou supprimer les répliques

Modulation Sigma Delta numérique RF

Quadrature DRFC + filtre LC passif :
Digital RF converter = DAC+mixer



Difficulté : raies parasites dues aux répliques du signal et du bruit dues à échantillonnage (CLK).

Filtrage bloqueur ordre 0 sinc insuffisant → filtre RF LC (Q élevé)
Difficile pour BW < 100MHz.
Intéressant pour signaux large bande.

Pour minimiser repliement du bruit : $f_{LO} = n f_{CLK}$

$$f_{LO} \le Q\ BW$$
$$f_{CLK} = OSR\ BW$$
$$\Rightarrow OSR \le \frac{Q}{n}$$

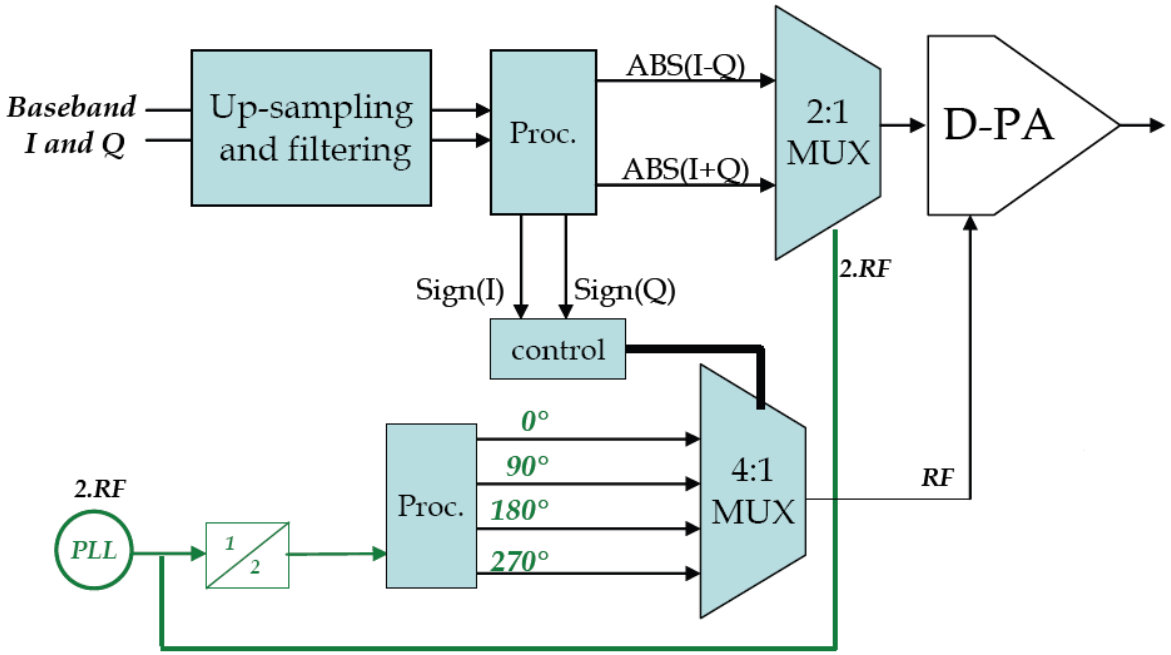
Q entre 10 et 25 typiquement → SNR < 40 dB pour DSM ordre 2

MIT

A. Jerng et al **Wideband Sigma Delta Digital-RF Modulator for High Data Rate Transmitters** IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 42, NO. 8, AUG 2007

Architecture numérique fondée sur un **DQM** : modulateur numérique en quadrature

$$y_{RF}(t) = I(t)\cos(\omega_c t) - Q(t)\sin(\omega_c t).$$



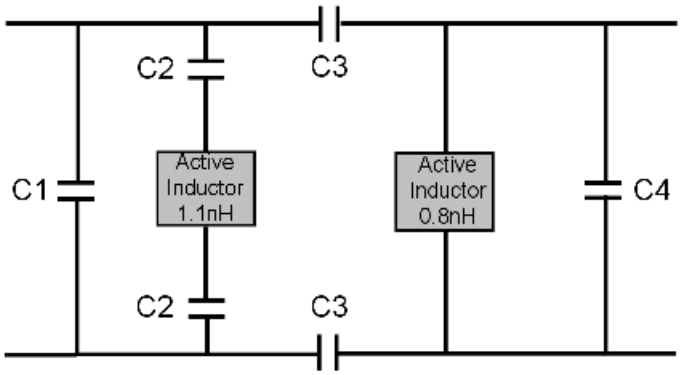
- 1 seul DRFC basé sur une combinaison numérique de I et Q
  - Évite déséquilbre
  - Le DQM réalise la somme en numérique et utilise 1 seul DRFC.
- ADPLL
- CMOS 90 nm
- Satisfait les spécifications WiMax 802.16a

Texas-Instruments.

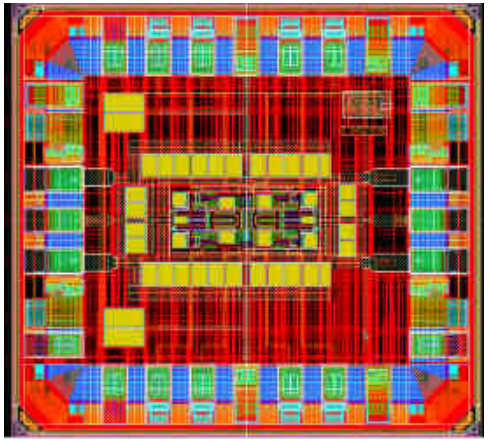
Parikh, V.K.; Balsara, P.T.; Eliezer, O.E.; **A fully digital architecture for wideband wireless transmitters** Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE

Numérisation des émetteurs 34

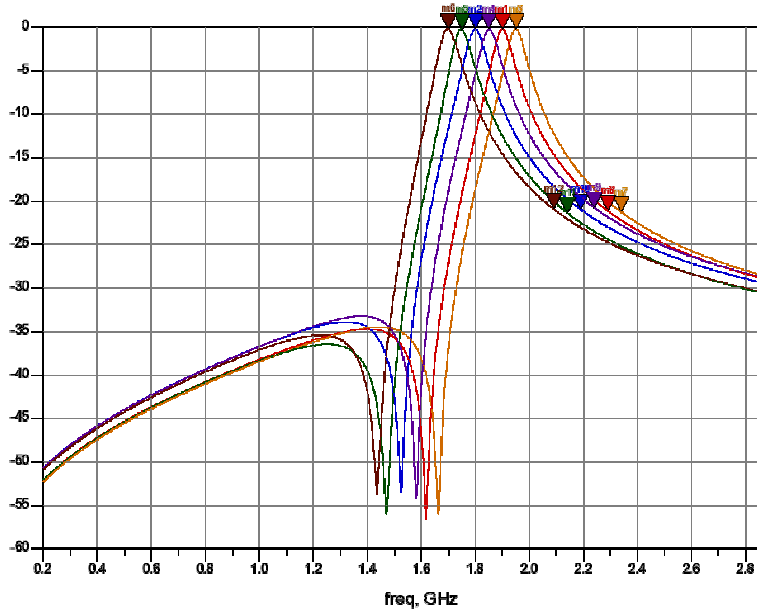
Ex : Filtre LC RF actif reconfigurable



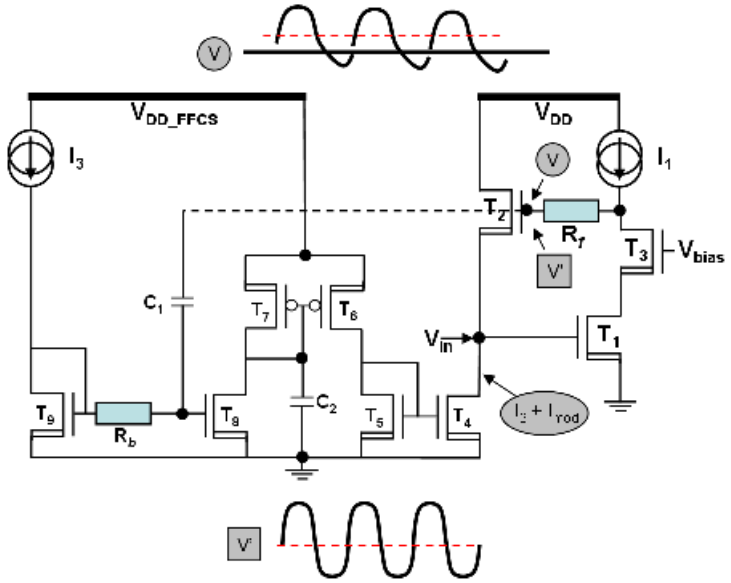
Topologie du filtre passe-bande différentiel



Layout du filtre (0.7mm²)



Filtre reconfigurable S21(dB) 1.7 -1.95GHz



Inductance active avec circuit de linéarisation

F. Robert et al, High efficiency LTE transmitter considering a polar PWM architecture and RF front-end blocks, Newcas 2011

Conclusions

Aspects technologiques

Les performances en puissance de sortie des approches numériques restent insuffisantes pour GSM/EDGE.

Les technologies CMOS submicroniques offrent de nouvelles possibilités de numérisation des architectures.

La réduction de dimensions CMOS s'accompagne d'une amélioration des performances en numérique.

Implémentation

Nombreuses implémentations différentes avec en commun la question du filtrage du bruit et des répliques.

Jusqu'à maintenant, les architectures numériques sont conçues en remplaçant des blocs analogiques par des blos numériques. Existe-t-il des approches numériques originales?